

现代宇宙学简史

蔡一夫¹ 朴云松² 张新民³

(1 中国科学技术大学 230026; 2 中国科学院大学 100049; 3 中国科学院高能物理研究所 100049)

自爱因斯坦发表广义相对论以来已有一百年,该引力理论得到了广泛验证也推动了基础物理的蓬勃发展。现代宇宙学正是爱因斯坦引力理论下发展极为成功的一门学科。本文旨在回顾现代宇宙学的发展简史,详细阐述研究现状和所取得的一系列科学成就,并对它的未来发展做一个展望。本文具体介绍热大爆炸宇宙学的发展历史、宇宙加速膨胀带来的暗能量惊人发现、星系旋转曲线所揭示的暗物质,以及早期宇宙暴胀学说和相应的扰动理论在微波背景辐射中的精确检验。这些课题都是现代宇宙学中最具影响的热点话题。笔者借此文抛砖引玉,期待更多年轻学者能加入到宇宙学的科研队伍当中,推动其在不久的将来能有更进一层的重大突破。

宇宙学,源自于人类最朴素的宇宙观,是对大自然一切存在所共同分享的一个居住环境的自我认知。古人举首眺望星空时,就在模糊的想象中认定了我们的宇宙即眼前这片浩瀚的星河。自古希腊时期,自然哲学家们如托勒密、亚里士多德等就通过他们最直观的去描述我们的宇宙,其中最有影响的便是托勒密的地心说。16~17 世纪,随着文艺复兴引发的科学革命,给人类带来了新的宇宙论,这便是由哥白尼、开普勒及伽利略等人提出和传播的日心说理论。紧接着牛顿于 1687 年发表了人类历史上最具浓重一笔的巨著《自然哲学的数学原理》,为人类揭开了万有引力的面纱,并让人们可以通过物理法则去认识天体运转的复杂规律。



图1 从地心说(左上)到日心说(右上)再到牛顿引力理论,人类耗费了千年的努力才得以一瞥宇宙的奥义

如果说万有引力定律是上帝赐予人类的第一颗苹果,那么第二颗便是爱因斯坦于 1915 年提出的广义相对论。这是一个彻底摒弃绝对惯性坐标的物理理论。在这里,引力被解释为宇宙时空的弯曲,而这一时空背景下所有的物体都遵循着测地线的统一法则,无一特殊。当爱因斯坦提出广义相对论之后就立刻将其应用到了我们的宇宙演化规律。当时天文学家对宇宙的认识还非常有限,甚至还不清楚银河系外还有大量和银河系类似的星系。因此,出于数学上的原因,爱因斯坦提出了后来影响深刻的宇宙学原理,即宇宙各向均匀和各向同性。在这一理论框架下,苏联宇宙学家弗里德曼于 1922 年给出了至关重要的描述宇宙背景的动力学演化方程,并指出宇宙背景可以是膨胀演化的。1929 年美国天文学家哈勃给出星系的红移与星系间的距离成正比的定律并推导出星系

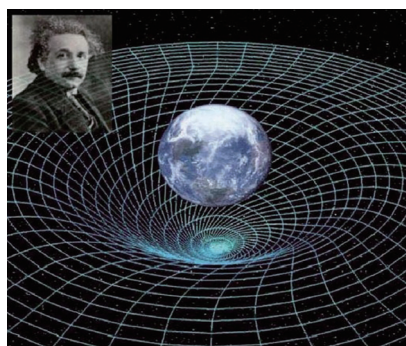


图2 根据爱因斯坦的广义相对论描述,我们的时空是弯曲的,星体运动的轨迹是测地线轨道,引力则是时空弯曲的效应

在相互退行的膨胀论。这一具有里程碑意义的发现意味着,我们的宇宙中星系曾经非常靠近,并在约百亿年前可能来自于一个时空点,而这一时刻的宇宙无比致密。

于是，在这个历史背景下，20 世纪 40 年代，伽莫夫等人建立起了热大爆炸宇宙学说。这一理论描述了我们的宇宙创生于一个时空奇点的大爆炸，在极早的婴儿期宇宙中充斥着由微观粒子构成的辐射流体，温度极高且密度极大，这一温度在整个宇宙背景下是统一均匀的，也就是我们的宇宙温度。宇宙创生之后的几分钟随着温度的降低，这些辐射粒子逐渐冷却，迅速通过核反应合成了氢氦等轻元素的原子核，并在三十八万年以后通过与电子的复合逐渐形成中性原子。随着膨胀的持续使宇宙温度进一步下降，最早的一批恒星就慢慢形成。随着这一批恒星的诞生与死亡，宇宙中又逐渐合成了碳氧硅铁等元素，同时老一批恒星的死去时抛出的星际尘埃又为新一代恒星的诞生创造了原料，乃至后来的星系结构逐渐出现。这整个过程便是热大爆炸宇宙学理论下的宇宙所经历的壮阔景象。而今天我们的宇宙温度被发现是 2.73K 的绝对温度。

热大爆炸宇宙学说预言了我们的宇宙有一个背景温度，这就说明我们的宇宙背景应该存在着一个具有特别分布规律的辐射。该预言为人类揭示了宇宙学历史上最为重要的实验发现之一，这便是宇宙微波背景辐射（CMB）。1989 年，美国宇航局发射了一颗专门探测 CMB 的观测卫星，即宇宙背景探测者卫星（COBE）。这一实验在当时以极为完美的精度验证了 CMB 的黑体谱及背景温度。不仅如此，COBE 卫星还为人类带来了一个额外的惊喜，在这个辐射背景上人类首次观测到“涟漪”，即十万分之一的温度涨落。这一微小的涨落后来在 CMB 实验的第二代和第三代，即美国宇航局的威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）和欧洲宇航局的普朗克（Planck）卫星，得到了极高精度的测量并被完美验证。由于 COBE 卫星实验所带来的巨大影响，2006 年诺贝尔物理学奖被授予了 COBE 卫星项目的两位首席科学家，马瑟和斯穆特。而这一领域的科技成就和其他宇宙学观测实验一起确立了所谓的“精确”宇宙学的来临。

CMB 的发现不仅仅是证实了热大爆炸宇宙学，它还为人们检验微观世界的基本物理法则提供了强有力的途径。例如，CMB 不仅具有温度涨落还可以给出偏振信号，这可以被用来对物理学中的基本对称性

进行精确的检验。值得一提的是，来自中国科学院高能物理研究所等单位的科研人员提出了利用 CMB 实验的偏振数据来检验在基本粒子物理中具有基础性地位的电荷-宇称-时间反演（CPT）对称性的新方法，并取得了重要成果。他们的基本想法是：如果 CPT 被破缺了，CMB 光子的偏振方向在宇宙空间中传播时会发生偏转，其偏转的角度代表了 CPT 破缺的程度，并改变最终可观测的 CMB 偏振功率谱。CMB 光子是我们能看到的最遥远的光子，其传播距离之长使得即使很微弱的 CPT 破缺反应也会在光子漫长的传播过程中累加成可观测的信号。研究小组设计的这种用 CMB 偏振检验 CPT 对称性的新方法使检测灵敏度大大提高，更有趣的是他们在首次分析 WMAP 和 Boomerang 南极气球实验数据后发现了 CPT 破缺的疑

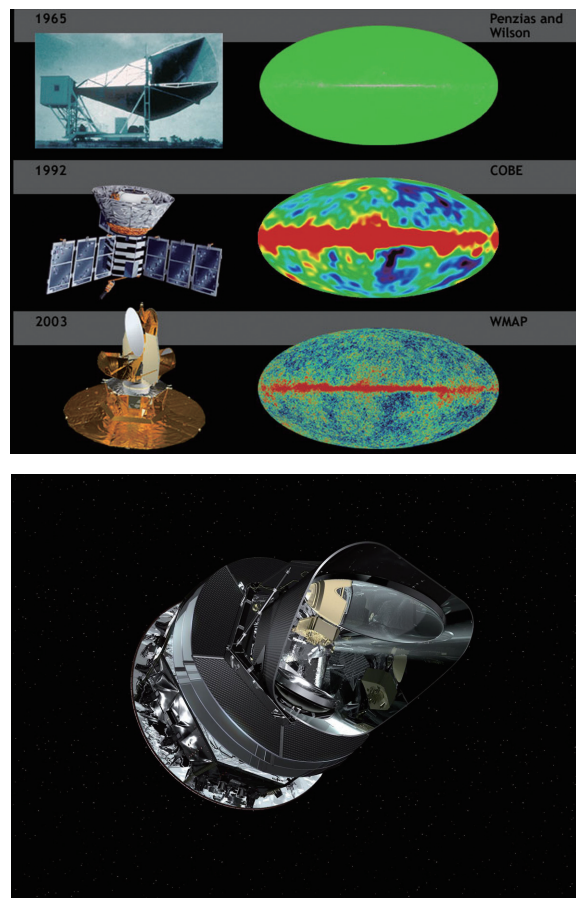


图 3 CMB 的发现与实验发展。上图从上至下分别是 CMB 的发现，第一代卫星实验 COBE，第二代卫星实验 WMAP；下图是欧洲宇航局最新发射的 Planck 卫星

纪念广义相对论创立 100 周年

似迹象。如果这一发现得到未来实验的进一步证实，将大大加深人类对自然界对称性的认知，并有助于人类了解宇宙中正反物质不对称性的物理起源。这一方法后来也为 WMAP 卫星以及 QUaD 地面望远镜等实验组所等采纳。为了推进中国宇宙学在 CMB 方面的实验研究，中国科学院高能所的宇宙学研究团队及国内一些感兴趣的单位正在计划与美国哈佛、普林斯顿大学的科学家们合作，积极推动在我国西藏阿里地区开展北半球首个 CMB 的观测实验。在我国阿里地区开展 CMB 观测意义重大，将大大推进 CMB 地面观测实现全覆盖的进程，贡献中国对 CMB 极化观测的力量。

热大爆炸宇宙学说所描述的宇宙热膨胀演化历史到了 20 世纪 90 年代已经深入人心，这一理念不仅在宇宙学家中被广泛接受，也被应用到基础物理的其他方面，例如粒子物理。甚至好莱坞的科幻电影也无处不在地吸收着宇宙学发展的新鲜理念，如盛极一时的“星球大战”系列电影。根据当时热大爆炸的观点，如果我们的宇宙是由冷物质例如星际尘埃所主导，那么这个膨胀的速率是在逐渐下降的。为了验证这一点，宇宙学家提出过一个历史名词叫做减速因子，并开展天文实验对 Ia 型超新星的爆发进行了观测。然而，实验结果是令人匪夷所思的。1998 年国际上两个超新星观测实验组通过独立观测得出了同样的结论，减速因子是负的！这意味着，今天的宇宙膨胀正在加速，似乎存在某一种神秘的负压物质作用于整个宇宙中的星系并将其推开。这一行为是通常的物质所做不到的。这一颠覆性的科学发现被誉为 20 世纪自然科学最伟大的发现之一，尽管它给理论物理学家带来了令人极为头疼的物理问题，但这恰恰说明了该发现是如此重要。为此领导两个超新星观测实验的科学家珀尔马特、里斯和施密特分别于 2006 和 2011 年获得了邵逸夫奖和诺贝尔物理学奖的表彰。

在当前的爱因斯坦引力理论框架下，这一驱动宇宙加速膨胀的神秘黑暗

使者就是当前宇宙学家梦回萦绕百思不得其解的暗能量。最简单的理论解释方法则是将爱因斯坦于 20 世纪 30 年代抛弃的宇宙学常数从他的回收站里重新捡回来放进我们的宇宙学方程，因为这一常数如果是正定的则可以在真空中产生具有排斥效应的能量，即正的真空能。然而，粒子物理学家又陷入了困惑的纠结，为何我们的宇宙中会隐藏着如此小的能量密度，以至于它一直隐藏在宇宙热膨胀的背景演化中不起任何效果直至今日才大显神威。文献中，富有想象力的宇宙学家们提出了各种解决方案，其中具有代表性的观点认为暗能量可能是一类新的动力学场并且其有效质量是极小的。这个场有着一个很浪漫的名字，叫做精质（Quintessence），这是一个来自于古希腊的古老传说，

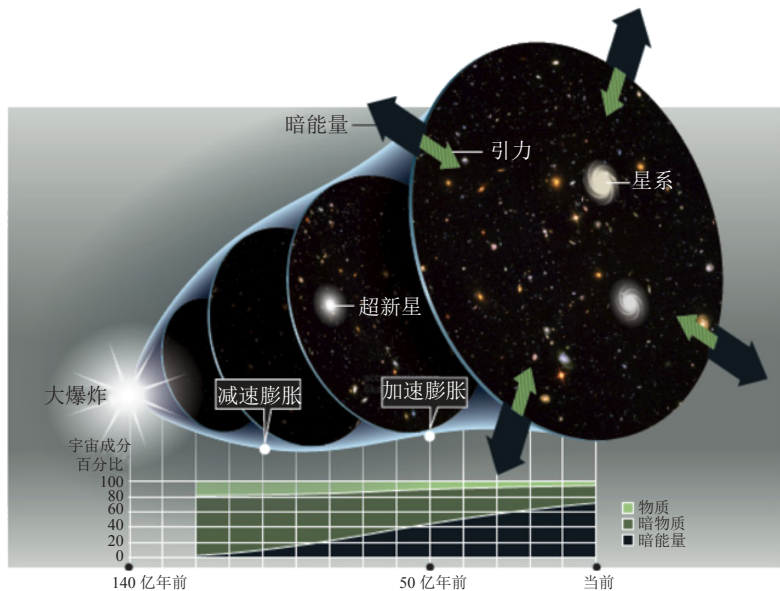


图 4 上图所示为 G299 Ia 型超新星遗骸；下图宇宙加速膨胀的大致时间表

是世界的第五元素（古希腊朴素唯物主义学者认为世界是由四个基本元素组成）。一旦我们假设暗能量是一个具有动力学的场，那么描述这个场动力学演化行为的最重要物理参量恐怕就是所谓的状态方程参数，它是物质场的压强与能量密度的比值。为了解释宇宙的加速膨胀，状态方程参数需要足够接近 -1 这么一个特殊的取值。然而，很快宇宙学家意识到暗能量的状态方程参数也可以是演化的，并且不同的演化行为带来的是完全不同类别的暗能量模型。在这个领域，中国的宇宙学家们做出了令世界侧目的重要贡献。特别是 2003 年前后中国科学院高能物理研究所的张新民组提出了一类新的暗能量动力学模型，它也有一个很浪漫的名字，叫做精灵（Quintom），这是因为它非常巧妙地将精质与幽灵（Phantom）暗能量模型结合在了一起，描述了一类状态方程参数可以通过动力学演化越过 -1 的暗能量动力学特性。该模型一经提出便立刻得到了国际宇宙学同行的广泛关注和评论，并于 2010 年在国际权威综述类期刊 *Physics Reports* 撰文介绍。

笼罩在热大爆炸宇宙学说上的“乌云”并非暗能量这么一朵，事实上另一朵“乌云”早在 20 世纪 30 年代就已经困扰了宇宙学家很久。20 世纪 70 年代天文学家通过测量星系的旋转曲线发现星系自转速度在较大尺度上并不符合理论规律，在标准理论框架下可见物质的引力太弱无法维系星系周边发光天体的稳定演化。因此，一个大胆的猜想被理论家提了出来，宇

宙中可能存在大量不可见的所谓的暗物质，正是这些暗物质提供了更多的引力来维系宇宙中的星系的稳定存在。和暗能量类似，暗物质的物理本质至今仍然尚未得知。理论学家相信暗物质似乎是粒子物理标准模型框架之外的一类新物质存在，并且这类物质几乎不参与我们所熟知的粒子物理中的相互作用，而仅仅参与到引力相互作用。此外也有很多疑似观测信号表明这类物质是以新的粒子形态生活在我们的宇宙当中，并对宇宙极早期的大尺度结构形成提供了不可或缺的帮助。直至今日，关于暗物质的理论解释仍然众说纷纭，宇宙学家致力于通过各种实验手段来探测暗物质，例如加速器、地下实验室、空间观测等方法，进行直接或者间接实验，以期待在不久的将来能逐渐揭开暗物质神秘的面纱，一探究竟。

之前我们介绍了热大爆炸宇宙学可以描述宇宙热膨胀的演化历史，其中有辐射、尘埃物质，以及通过超新星观测发现的暗能量和星系旋转曲线发现的暗物质。正是这些物质成分构成了我们所观测到的宇宙。通过 CMB 实验、超新星实验、大尺度结构观测等一系列的天文观测数据，再结合热大爆炸理论分析，让我们得到了一份极为精确的宇宙配方。具体来说，宇宙中的可见物质成分的平均能量密度约为每立方米 4.3×10^{-25} 克。而这些可见物质在宇宙中所占的比分只有约 4.9%，暗物质占到了 26.8%，暗能量则达到 68.3% 之多。

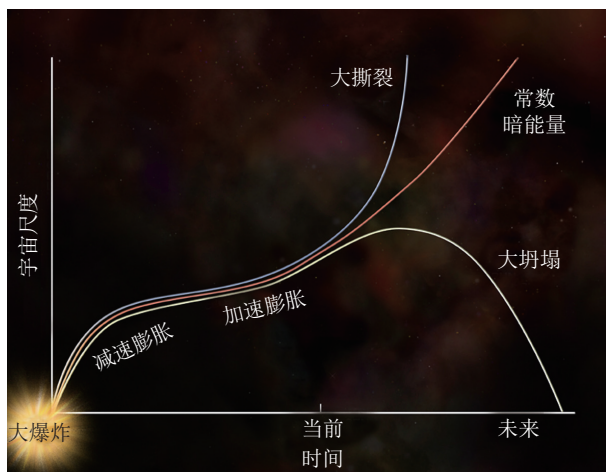


图 5 暗能量决定了宇宙演化的命运

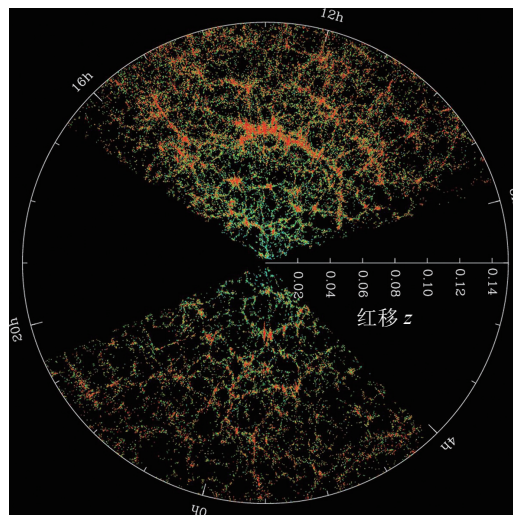


图 6 斯隆巡天望远镜给出的在暗物质影响下宇宙大尺度结构随红移的分布

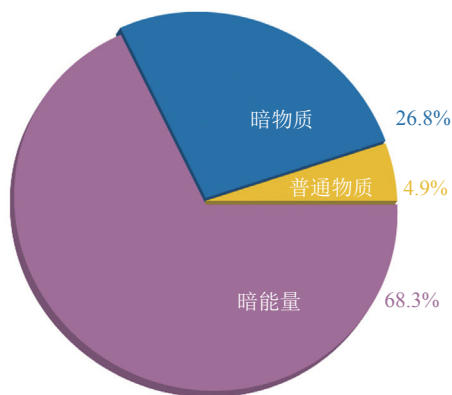


图 7 宇宙的配方

然而，这并非宇宙学研究篇章的结尾，而仅仅是一个序曲。热大爆炸宇宙学虽然精确描述了我们的宇宙从创生后几分钟到当前 138 亿年年龄的成长过程，这一学说却面临着若干理论短板。例如，该学说无法解释宇宙为什么在所有方向上看起来都如此的均匀和平坦，大尺度结构演化所需要的种子来源于何处，等等。为了解答这一系列的理论问题，美国宇宙学家古斯于 1980 年提出了暴胀学说。这一学说指出我们的宇宙在刚刚诞生约 10^{-36} 至 10^{-32} 秒曾经历过一次极为剧烈的加速膨胀，这一想法与暗能量解释宇宙晚期加速膨胀极为类似，因此它也需要一个动力学的标量场，被称为暴胀场。该场也像暗能量一样能将宇宙空间迅速拉伸开来，只不过这个加速膨胀的规模更为波澜壮阔，因为它在短短的时间里将我们的宇宙尺度放大了至少 10^{25} 倍。因此，这个过程十分有效地抹平了宇宙空间可能存在的任何一丝一毫的不平坦性和不规则性。

特别令人称道的是，暴胀场自身在不断产生着微小的量子涨落，这些量子涨落的波长又因为暴胀而被拉伸到极大尺度并且能退相干成经典扰动。这些经典扰动最后就在 CMB 中留下了丝丝许许的“涟漪”，并且在暴胀结束之后为我们的宇宙中大尺度结构形成提供了宝贵的种子。这一理论看上去极为梦幻，然而这一看似天马行空的宇宙学扰动理论所预言的近标度不变的温度扰动功率谱和大尺度结构物质功率谱，都在后来日新月异的天文观测实验中逐一得到了极高精度的检验。在现代宇宙学中，宇宙学扰动理论正是基于爱因斯坦的引力理论进行微扰展开并通过研究这些

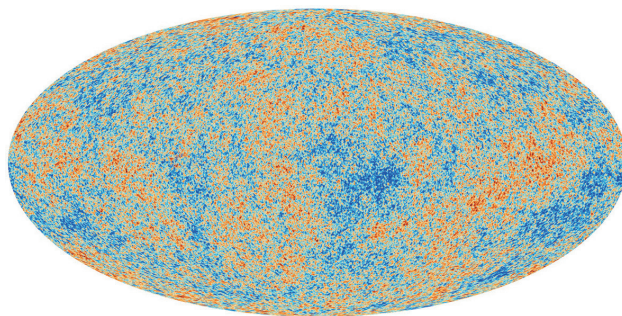


图 8 CMB 的温度涨落，当前理论普遍认为该温度涨落起源于暴胀时期的原初量子涨落

微小的原初扰动的演化行为去确定星系及星系团等大尺度结构的最终形成过程。可以说宇宙学扰动理论的成功是今天奠定粒子宇宙学的理论基础。

正是基于爱因斯坦提出的广义相对论，热大爆炸宇宙学说和宇宙学扰动理论结合在一起，给出了一个仅仅含有六个基本参数的宇宙学模型，被称之为和谐宇宙模型（Concordance model）。这个模型也被普遍认为是宇宙学框架下的标准模型。当前宇宙学家们正在致力于通过各种天文实验更精确地检验这个宇宙学标准模型。然而，现代宇宙学，作为自创生至今尚不足一百年的科学分支，在过去的几十年中已经取得了一系列惊艳的重大突破，包括宇宙年龄的精确测量及宇宙加速膨胀等，这些无一不充分证明了爱因斯坦引力理论所取得的巨大成功。但是，无论是宇宙学家还是粒子物理学家都从未认为目前的宇宙学模型是完美无缺的。例如，无论是热大爆炸学说还是暴胀学说，都不可避免的存在一个假设就是我们的宇宙来自于一个时空的奇点，而这一奇点的物理性质到底如何，是否存在正确的数学描述，这些都是尚未得知的物理难题。例如，有相当一部分宇宙学家认为宇宙创生的奇点可能并非奇点，而是一个极小尺度的时空，我们的宇宙在大爆炸或暴胀前可以一直存在，或许是几乎处于静态，在缓慢膨胀中，或许可能曾经经历过大收缩的过程，后一图像被称之为反弹学说。宇宙学的研究也极大推动了粒子物理的基础理论的发展，例如弦论等。因此，对宇宙学的研究还远远没有到宣称收获的时候，恰恰相反，这应该还只是一个更为成功的理论的初章。